促进南方红壤丘陵区农业可持续发展的复合农业生态系统长期观测研究

魏文学* 谢小立 秦红灵 李凤娜 陈安磊 张文钊 盛 荣
陈焱国 侯海军 尹春梅 陈春兰 刘 毅 王 卫 刘 飞

1 中国科学院亚热带农业生态研究所 亚热带农业生态过程重点实验室 长沙 410125
2 中国科学院桃源农业生态试验站 桃源 415700

摘要 我国南方红壤丘陵区土壤质地黏重，透水性差，季节性降雨分布严重不足，极易发生水土流失；不合理的耕作措施加剧土壤侵蚀，导致土壤肥力下降，制约当地农业的可持续发展。1979年中国科学院桃源农业生态试验站（以下简称“桃源站”）建站以来，系统开展了区域农业生态系统优化管理、农业整体效益的提高和建立区域农业综合发展的技术体系与优化模式，并进行示范推广，为南方红壤丘陵区农田生态系统耕地地力提升和水土流失治理、区域农业结构调整和生态环境改善提供重要理论和技术支撑。通过系统分析南方潜育性和次生潜育化水稻土的形成原因，为我国潜育性水田的治理提供技术支撑；研究红壤稻田生态系统可持续生产力与系统健康的协调机制，为稻田生态系统持续、高效生产提供理论依据和技术支撑；系统解析驱动稻田N_2O和CH_4排放关键过程的微生物作用机理，为我国农田温室气体减排提供重要的科学依据；系统解析我国农田生态系统土壤细菌和反硝化微生物的分布格局和主要驱动因素，为大尺度刻画我国农田土壤微生物群落组成机构及生态功能奠定基础；研究猪日粮功能性氨基酸代谢与生理功能调控机制，提升我国科学养猪水平和养猪业的健康可持续发展；探明了多年蔬菜连作对土壤氮素转化功能的影响及其微生物作用机制，并提出相应调控措施，为蔬菜土氮素的调控提供强有力理论依据和技术支持；研究典型农田生态系统养分流失特征及影响因素，构建丘岗复合农业生态系统氮磷拦截与生态消纳模式和稻田流失氮磷生态湿地消纳技术，为防控农田生态系统氮磷面源污染提供技术支撑；构建南方丘陵区坡地种草养羊与农牧资源循环利用模式并开展示范推广，服务当地农业可持续发展。未来，桃源站在中国科学院“率先行动”计划指导下，将为区域农业可持续发展作出更大的贡献。

关键词 南方红壤，水土流失，耕地退化，温室气体排放，农牧复合，可持续发展

DOI 10.16418/j.issn.1000-3045.2019.02.013

---

*通讯作者

资助项目：CERN野外台站研究项目，CNERN野外台站研究项目，国家自然科学基金重点项目（41330856），国家重点研发计划项目（2016YFD0200307、2017YFD030150402、2017YFD0202001）
修改稿收到日期：2019年1月29日

红壤是我国分布面积最广的土类之一，主要分布在北纬25°—31°的中亚热带广大低山丘陵地区，总面积达5 690万公顷。南方红壤丘陵区以长江中游洞庭湖流域为核心地带，横跨湘、鄂两省，地处湖南北部，长江中游南岸，西南接湘、资、沅、澧四水，北纳荆江四口分流。洞庭湖流域集水面积26.3万平方公里；其中湖南省境内面积20.4万平方公里，湖北省境内5.9万平方公里，为我国重要的农业生产区，以“鱼米之乡”著称。该区域年均温14℃—18℃，最冷月均温0℃—5.5℃，绝对最低气温–10℃—–20℃，最热月均温27℃—28℃，无霜期210—270天，10℃以上活动积温达4 500℃—5 000℃。农业一年二熟或三熟，年降水量1 000—1 500 mm，季节分配较均，但有“伏旱”。土壤主要是红壤、黄棕壤或黄褐土，平地大部为水稻土。红壤生物富集作用十分旺盛，自然植被下的土壤有机质含量可达70—80 $g \cdot kg^{-1}$；由于不合理的耕作，土壤侵蚀严重，土壤肥力下降。黄棕壤有机质含量也比较高，但经过耕垦明显下降。该地区的红壤和黄棕壤一般质地黏重，透水性差，地表径流量大，若植被消失、土壤结构破坏，极易发生水土流失，制约当地农业的可持续发展。

中国科学院桃源农业生态试验站（前身“中国科学院长沙农业现代化研究所桃源实验站”，自1989年5月1日更名为现名，以下简称“桃源站”），由原中国科学院桃源农业现代化研究所于1979年6月成立，是中国科学院设在我国江南丘陵地区，代表区域为亚热带江南红壤丘陵复合农业生态系统类型区。桃源站的科学研究大致可分为3个阶段：第一阶段为20世纪80年代，科研任务主要是建设农业现代化基地县，探索我国农业现代化道路；开展了探索基地县实现农业现代化过程中的科学技术研究、中间试验、新技术运用和推广及农业经济等课题研究。第二阶段为20世纪90年代，主要开展了亚热带红壤丘陵区农业生态系统结构、功能、演替及其调控，以及农业资源高效利用和可持续发展的理论与技术、生态系统环境变化、区域农业的综合发展与生态建设、复合农业生态系统综合观测研究。21世纪初至今为第三阶段，科研任务主要是围绕亚热带农业生态系统格局与过程调控及发展模式等问题，重点开展区域农业生态系统优化管理、农业整体效益的提高、建立区域农业综合发展的技术体系与优化模式，以及复合农业生态系统的环境要素进行动态监测与综合研究。通过长期研究，桃源站为南方红壤丘陵区农田生态系统耕地地力提升和水土流失治理，区域农业结构调整和生态环境改善提供重要理论和技术支撑。

1 系统分析了南方潜育性和次生潜育化水稻土的形成原因，并且创制了一系列改良措施，为我国潜育性水田的治理提供了技术支撑，为国家粮食安全作出了重要贡献

根据1978—1979年桃源县农业资源综合考察和第二次土壤普查，桃源县潜育性稻田的面积高达43.6万亩，占全县稻田的41.6%，比第一次土壤普查增加28.6万亩[1,2]。南方各省约有潜育性稻田1亿亩，是一个粮食产量提高的严重障碍。桃源站科学家首次提出了次生潜育化水稻土的概念，并应用化学、物理学、生物学等现代科学理论与研究手段，对潜育性和次生潜育化水稻土的形成条件与类型，以及土壤的物理学、化学、生物学及养分特性，进行了较为系统的研究。阐明了潜育性水稻土的主要缺陷是土壤通透性差、土温低、还原物质积累较多，土壤微生物数量少、活性低，有机物矿化分解和养分释放缓慢，有效养分不足。根据其形成原因和特性，将潜育性水稻土划分为6个类型，并提出了3项主要改良措施：① 针对潜育性水稻土的不同类型，采取挖明沟或暗沟的工程排水措施，排除土壤渍水[3]；② 实行水旱轮作等生物改良措施，缩短土壤渍水时间，改善土壤通气性，改良土壤理化及生物性状[4]；③ 合理施肥，以协调土

壤养分供应状况[5,6]。

从1979年开始，通过5年多的研究、试验、示范和推广，对潜育性水稻土的形成和改良途径有了比较明确的认识和措施，桃源县全县潜育性水稻土的改良面积已达20万亩，累计共增产稻谷7 680万斤，按当时每百斤稻谷11.5元计算，共增加产值883.2万元（若按平均价格每百斤13.5元计算，则增加产值1 036.8万元），扣除工程措施成本100万元，获净经济效益783.2万元[6]。该项研究成果也为改良我国南方约1亿亩潜育性和次生潜育化稻田提供了经验。

2 系统研究红壤稻田生态系统可持续生产力与系统健康的协调机制，为稻田生态系统持续、高效生产提供理论依据和技术支撑

为研究长江中游红壤丘陵区施肥对水稻生产力及肥力的影响，桃源站设置了稻田施肥长期定位试验（图1），主要设置了化肥、化肥配合有机物还田等施肥处理。通过分析稻田生态系统生产力演变状况，以及稻田生产力持续性特征、原因及其稳产性的影响因素，证实稻田生态系统是一个自我维持能力较高的生态系统。氮（N）、磷（P）、钾（K）养分均衡施用是高产、稳产的基本条件，而稻草、绿肥等有机物的配合施用均表现出了产量增益效应，但是随着N、P、K肥料配合程度的提高，有机物循环利用的增产效益呈明显下降趋势。施肥对水稻产量及其持续性影响的实质主要体现在养分的均衡供应方面，在养分缺乏情况下，有机肥的施用能显著提高水稻产量及稳产性。但在均衡施肥（N、P、K施肥模式）的基础上，大量的有机物无机肥的施用反而降低了产量稳定性[7-9]。可见，适量和平衡地提供水稻所需的营养元素是水稻稳产的物质基础，利用稻田生态系统内的有机物能实现稳产和部分养分的替代功能。因此，控制化肥的投入或配合有机肥的施用是区域稻田生产力可持续性及系统健康的重要调控手段。

由于稻田N、P等养分流失较其他土地利用方式严重[10]，且化肥撒施是导致稻田N、P流失的重要原因之一[11-13]，桃源站构建了基于化肥一次性深施的减氮控磷施肥技术[14]，并建立了双季稻减氮控磷长期定

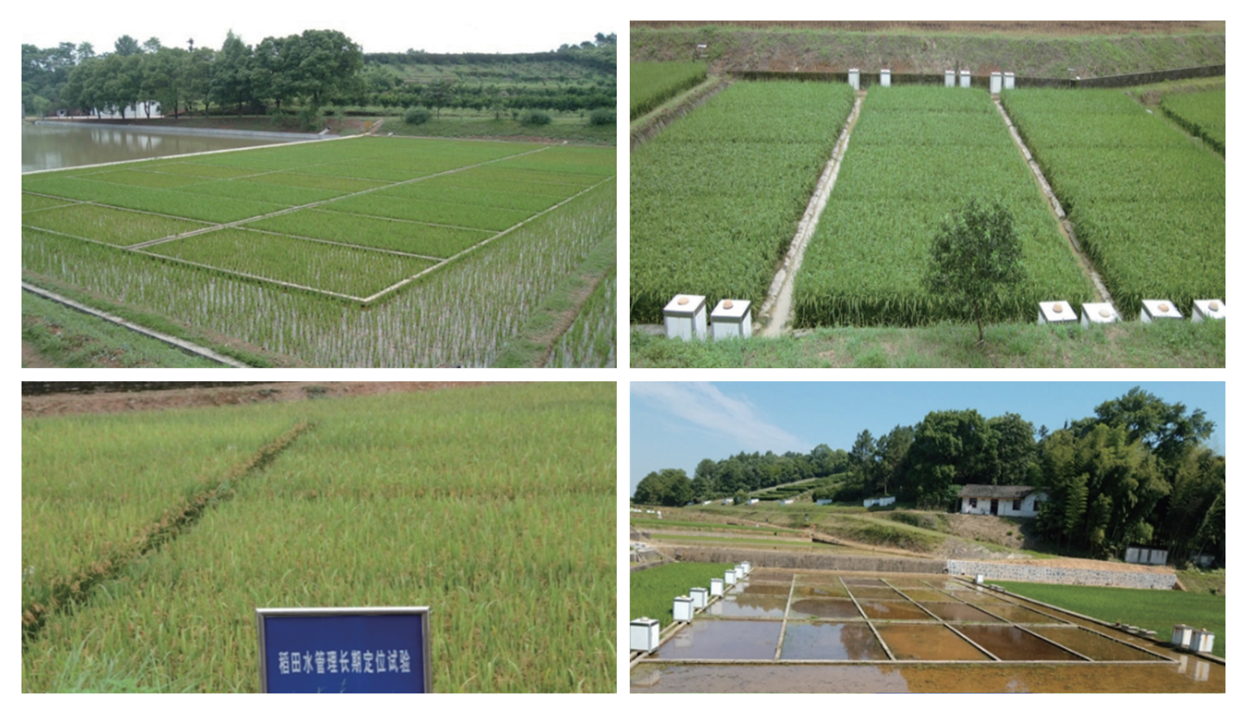


图1 稻田水肥高效利用长期定位试验

位试验。连续6年的田间试验结果表明，通过将双季稻化肥施用方式由表面撒施改为深施，减少30%氮肥用量不仅可以维持双季稻产量的稳定，还可以增产5%—10%左右，且氮肥利用效率提高到44%左右，每年可减少双季稻田氮肥投入90 kg · hm^{-2}。通过分析发现，该施肥技术可降低稻田表层水中70%—90%的氨氮和20%—30%的总磷，每年减少双季稻田N流失9 kg · hm^{-2}，P流失0.15 kg · hm^{-2}。基于双季稻田减氮控磷施肥技术的研发，在桃源县枫树乡开展了机械化大田示范。连续2年的试验结果显示，与当地的常规抛秧相比，该技术可以显著降低控制稻田表面水层的氮、磷浓度，进而有效控制了氮、磷损失，显著提高了氮肥利用效率。因此，通过进一步的技术改进和理论探究，该施肥技术可以在我国南方双季稻田进行推广应用。

近10年来，稻田面临着休耕、弃耕等土地利用方式改变的风险。农村劳动力不足和稻作经济收益较低是我国南方传统稻作区弃耕日趋严重的关键驱动因素之一。稻田土壤碳库是在长期人为水耕条件下形成的，其弃耕前后土壤的物理、化学和生物学特征显著改变[15,16]，且有别于其他农田生态系统弃耕前后的改变，因此稻田弃耕后土壤碳库的变化特征应不同于其他弃耕农田。为弄清弃耕对稻田土壤碳库影响，我们利用稻田弃耕长期定位试验为研究平台，从土壤有机碳、活性碳库动态变化特征及其影响因素等角度开展了相关研究[17]。数据结果表明，弃耕8年后稻田土壤有机碳及碳库分别降低了9.9%—20.9%和10.2%—20.8%，即平均年降低速率为0.30—0.60 g·kg^{-1}·yr^{-1}和0.50—1.15 t·hm^{-2}·yr^{-1}，碳下降速率是碳积累速率的1.5—1.8倍。高碳土壤对弃耕更为敏感，总体表现为弃耕前稻田碳含量越高，弃耕后下降的速度越快，弃耕4年是土壤碳快速下降的时间节点。研究还阐明了土壤有机碳显著下降的关键原因：土壤由稻田的厌氧环境转变为弃耕后的好氧环境，加速了有机物和土壤有机碳的分解，同时也降低了土壤团聚体、土壤矿物及铁氧化还原过程对土壤碳的固持及保护作用，从而导致土壤碳形成量远小于碳分解量。研究还显示，弃耕后植被恢复并没有弥补土壤碳库的损失，稻田土壤从碳库向碳源转变。可见，稻田弃耕与传统意义上的弃耕地力恢复结论不同，稻田土地利用方式转变应采取配套措施防止土壤的退化，保持土壤的高肥力。

3 系统解析驱动稻田 N_2O 和 CH_4 排放关键过程的微生物作用机理，为我国农田温室气体减排提供重要的科学依据。

由产甲烷菌和甲烷氧化菌参与的CH_4产生和氧化过程在很大程度上决定了土壤CH_4排放量[18,19]；而反硝化作用作为氮循环的一个重要环节，是由土壤中具有反硝化能力的微生物所调控的生物化学过程，也是温室气体N_2O排放的主要途径之一[20,21]。因此，了解CH_4和N_2O产生和转化过程的微生物作用机理对于今后的合理施肥以及控制温室气体排放起着至关重要的作用。

中期晒田（落干）是稻田管理过程中重要的农艺措施，稻田淹水-落干过程排放大量N_2O，水稻土含水量为80%土壤孔隙含水量（water-filled pore space，WFPS）时N_2O释放量最大，含水量在60% WFPS时细菌比真菌对N_2O排放的贡献要大。接着采用典型水稻土进行了淹水-落干和干湿交替过程的室内模拟试验，结果发现，淹水-落干过程中氧化还原电位（electric potential，Eh）的变化与N_2O释放动态显著相关明确了氧化还原点位是调控N_2O排放的主导因子。淹水-落干过程中N_2O的释放量主要是细菌作用产生，真菌的贡献只占10%左右。*narG*基因丰度和组成与土壤Eh和N_2O排放速率间呈显著相关，而*nosZ*基因没有这种相关性。这表明水稻土淹水-落干过程中含*narG*基因的微生物种群组成和数量是驱动N_2O排放的关键反硝化微生物种群，而含*nosZ*基因的微生物种群与N_2O排放动态并无直接关系[22]。在此基础上，进

一步通过设计土壤培养试验，系统研究了典型水稻土淹水-落干过程中N_2O产生、转化与释放的关键微生物驱动机制。结果表明，在水稻土落干过程中0—3 cm土层是N_2O排放的主要来源，落干过程中的硝化微生物与反硝化微生物的协同作用是导致表土层产生和释放大量N_2O的关键微生物驱动机制[23]。

在淹水-落干过程中水稻根系生长显著提高了根际区域N_2O排放速率，而在N_2O排放过程中水稻根际区域土壤氨氧化细菌和含*narG*的硝酸还原菌的数量显著增加。这说明落干过程中根际土壤比非根际土壤能释放更多的N_2O可能是由于根系生长导致了根际区域有更强硝化和反硝化微生物协同作用的结果[24]。通过功能基因的高通量测序分析进一步证实，根际土壤的β-变形菌纲（Betaproteobacteria）等反硝化种群丰度显著高于非根际土壤，且不同水分条件和不同采样时期均表现出同样的趋势。这说明水稻根际环境可能会刺激这些反硝化细菌的活性，从而增加土壤N_2O释放潜势。

磷肥施用促进土壤CH_4排放，而氮肥显著提高了土壤N_2O排放。稻草还田处理会增加土壤CH_4和N_2O排放。施肥显著改变了土壤CH_4和N_2O产生、转化相关关键功能微生物种群结构、丰度（DNA水平）和表达种群结构及丰度（mRNA水平），尤其是其表达结构，对施肥响应更加敏感。不同施肥制度影响土壤CH_4和N_2O产生与转化可能主要是通过改变相关功能微生物的表达特征调节土壤CH_4和N_2O的产生、转化，从而控制土壤CH_4和N_2O的排放量。

4 系统解析了我国农田生态系统土壤细菌和反硝化微生物的分布格局和主要驱动因素，为大尺度刻画我国农田土壤微生物群落组成机构及生态功能奠定基础

针对农田生态系统土壤微生物是否存在着规律性的分布格局，以及驱动农田土壤微生物种群分布的关键因素等关键科学问题，依托国家自然科学基金重大项目“典型稻田土壤关键生物地球化学过程与环境功能”，系统研究了我国南方典型水稻土的细菌组成与分布规律，揭示了土壤母质特性对土壤细菌组成起决定性作用，长期水稻种植可以导致耕作层土壤细菌群落结构在一定程度上发生改变，但这些变化并不足以改变土壤母质性质决定的土壤细菌组成结构特征[25]。

进一步依托中国科学院战略性先导科技专项任务，通过对我国南方红壤、华北潮土和东北黑土等旱作土壤的系统采样分析，揭示了土壤细菌种群组成结构与土壤类型有紧密关系，表明大部分细菌类群对生境条件有强烈的选择适应性，长期的人为耕作管理在不同土壤中均富集相同的优势细菌群类。但对于土壤氮素循环功能微生物种群而言，长期耕作可富集类似的反硝化微生物种群，且与土壤类型无关，其中包括反硝化细菌和反硝化真菌。这些研究结果对调控土壤氮素循环过程和增加氮肥利用效率具有重要的理论支撑价值。

5 研究猪日粮功能性氨基酸代谢与生理功能调控机制，提升我国科学养猪水平和养猪业的健康可持续发展

目前，养猪生产中，面临的主要问题包括全球范围内蛋白质饲料资源的日益短缺和现代规模化养猪排泄物中氮排放所引发的环境污染，这成为制约养猪生产可持续发展的瓶颈[26]。随着“理想蛋白质”概念的发展和“理想蛋白质的氨基酸模式”建立[27,28]，加之合成氨基酸工业化生产规模的扩大，极大地推动了低蛋白日粮的研究和应用。以完善低蛋白氨基酸平衡日粮理论为出发点，深入探究肌肉组织中含氮物的周转与利用机制及其伴随的能量代谢规律，为在养猪业中推广应用低蛋白日粮精准饲养技术提供理论依据[29]。

分析低蛋白日粮对不同阶段猪肠道氨基酸转运载体的表达，发现仔猪阶段较生长猪和育肥猪阶段肠道氨基酸转运载体更容易受到低蛋白影响，同时低蛋白

普遍上调酸性氨基酸转运载体的表达，而对碱性氨基酸转运载体的表达则具有一定的抑制作用，其机理可能受循环系统氨基酸含量的综合反馈调节。此外，低蛋白日粮平衡支链氨基酸（BCAAs）可显著改善肠道形态，促进肠细胞的增殖，提高肠道氨基酸转运载体的表达水平，最终促进肠道氨基酸的吸收与利用，从而改善蛋白质代谢[30]。低蛋白日粮平衡 BCAAs 比例可通过提高机体氨基酸转运载体信号，促进肌肉组织对血液中游离氨基酸的吸收与利用，最终通过 mTORC1 信号途径和 UPS 途径调控肌肉组织蛋白质代谢，从而促进肌肉组织生长（图 2）[31]。低蛋白日粮合理平衡氨基酸（包括必需氨基酸尤其是 BCAAs 等）不影响猪的生产性能，还能改善猪的肠道健康、免疫系统和肉品质量，降低生产成本，并通过减少总氮排泄量，在一定程度上缓解养猪生产对生态环境的污染，这对现代生猪养殖和精准饲养有着重要启示。

6 探明了多年蔬菜连作对土壤氮素转化功能的影响及其微生物作用机制，并提出相应调控措施，为蔬菜土氮素的调控提供强有力理论依据和技术支持

我国的蔬菜种植面积达 3 亿亩，约占世界蔬菜种植面积的 35%，在农业生产中占重要地位。然而，蔬

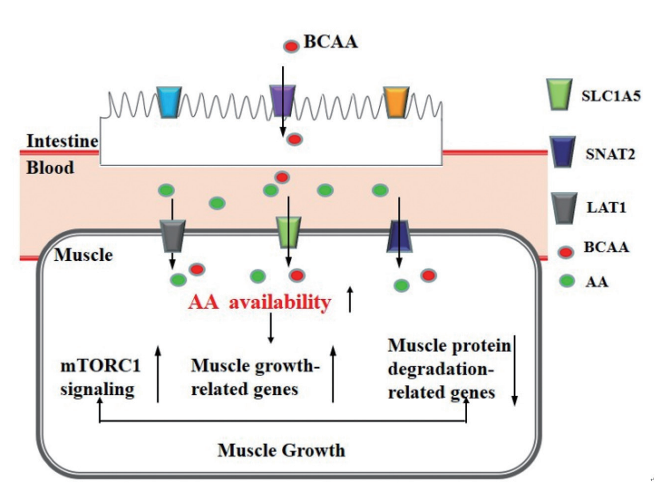


图 2　低蛋白日粮平衡 BCAAs 比例对猪肌肉组织蛋白质代谢的调控机制图

菜生产中普遍存在不合理施肥的现象，单位面积肥料施用量一般是其他主要农作物的数倍。大量化肥施用导致氮素在蔬菜和土壤中的残留量高，一方面造成了蔬菜硝酸盐含量超标和蔬菜品质下降，另一方面也造成了温室气体（N_2O）排放和 NO_3^- 淋失等环境污染问题[32-36]。由于蔬菜土壤种植强度高、化肥投入量大以及氮肥利用效率低，那么在这种长期种植蔬菜的土壤中，氮肥的转化过程和功能是否与大田作物土壤不同？土壤微生物在这些过程中扮演了什么角色？它们的作用机制又是什么？类似问题还不清楚。针对这些问题，通过系统采集河流冲积物发育的种植年限不同的蔬菜土壤样品，利用分子生物学技术分析了土壤硝化功能微生物种群多样性、群落组成的变化与硝化作用的偶联关系[37,38]。结果发现，长期蔬菜连作显著使得土壤中硝化细菌（AOB）优势种群富集，土壤硝化能力增强。土壤 pH 值以及 Olsen-P 含量的变化是影响 AOB 群落结构的主要土壤因素。土壤中氨氧化古细菌（AOA）丰度明显高于 AOB，平均为 AOB 丰度的 6 倍，但土壤硝化势（PNF）与土壤中 AOB 丰度成显著的正相关，而与 AOA 没有显著的相关性。

针对长期不合理高化肥投入量导致城郊区菜地土壤环境恶化的现状，为探讨氮肥减施对城郊区菜地土壤氮磷累积及蔬菜产量品质的影响，我们应用田间小区试验，研究了长沙市郊 2 种不同菜地土壤中不同减氮处理：① 氮肥减施 20%（80% N）；② 施缓释尿素并减氮 20%（80% N(CRU)）；③ 氮肥减施 20% 并添加脲酶抑制剂/硝化抑制剂（80% N+QD）；④ 氮肥减施 20% 并添加土壤调理剂（80% N+SC）的环境和农学效应。结果表明：与常规施肥处理相比，采用缓释尿素减施 20% 化学氮肥（80% N+QD）有效降低了菜地土壤 Olsen-P 和 NO_3^--N的含量，减少了其面源污染风险，但该法处理后的蔬菜可食部分容易累积硝酸盐，也增加了食用风险。通过添加脲酶抑制剂/硝化抑制剂减施 20% 化学氮肥（80% N+QD），

生育中期土壤 NH_4^+-N 含量和蔬菜鲜样产量分别增加了 69.2% 和 262.0%，对土壤 Olsen-P、NO_3^--N以及可食部分硝酸盐含量影响不显著；减施 20% 化学氮肥配以添加土壤调理剂（80% N+SC）在 2 种种植年限的菜地中效果欠稳定。兼顾经济、食用风险、生态环境等效益，建议在高肥力菜地土壤中，氮肥减量与脲酶抑制剂、硝化抑制剂配合施用[39]。

为进一步探明硝化抑制剂对氮素转化过程及功能微生物的影响，我们选取长沙黄兴镇蔬菜基地 2 种蔬菜土，设置室内土壤培养试验，设置单施尿素（CK）和尿素与硝化抑制剂双氰胺配合施用（DCD）2 个处理，通过系统监测培养过程中土壤中 NH_4^+-N、NO_3^--N 含量变化以及土壤中氮素转化功能微生物的响应发现，在培养过程中 DCD 处理使 2 个供试土壤的 NH_4^+ 浓度稳定在较高水平，而 NO_3^- 浓度则明显低于对照。施用 DCD 导致土壤中硝化基因 *amoA* 丰度显著减少，而对 16S rRNA 和反硝化基因 *nirK* 丰度没有产生明显影响。因此，DCD 在菜地土壤中主要通过抑制氨氧化细菌的繁衍来抑制硝化作用[40,41]。

7 对比剖析了不同利用方式对红壤坡地土壤养分转化与迁移过程及其微生物机制，为加强红壤坡地退化生态系统生物多样性保护和生态功能恢复提供理论依据，为丘岗地综合治理与开发提供了科学依据和示范样板

红壤坡地是我国长江中下游地区主要的土地资源之一，目前主要利用方式是农作物轮作，如植果、药、茶以及经济林、草等。由于植被群落单一和农事耕作，红壤丘陵坡地成为中国南方面积最大、垦殖指数最高、水土流失最为严重的区域[42-44]。目前对红壤地区生态环境退化各项指标已有较多的论述与研究[45-47]，但针对该区生态系统生物多样性与生态系统功能的恢复这一生态学研究热点的论述尚不多见，特别是针对土壤微生物群落多样性和功能的研究还比较缺乏。因此，以桃源站不同土地利用方式长期定位试验为平台，应用 T-RFLP 和 RT-PCR 技术研究红壤坡地利用方式对土壤细菌群落结构的影响。结果表明，红壤坡地 3 种土地利用方式土壤细菌多样性指数农田 > 茶园 > 自然恢复，但土壤细菌数量茶园 > 自然恢复 > 农田，茶园土壤细菌数量是农田的 8.76 倍。农田与茶园和自然恢复土壤细菌种群结构均存在显著的差异，而茶园和自然恢复土壤细菌群落比较相似。不同土地利用方式土壤有机质、有效磷和速效钾均对土壤细菌群落结构产生显著影响。综合考虑经济效益和保持红壤坡地的可持续利用，认为茶园是中国南方红壤丘陵坡地可持续利用的一种有效方式[48,49]。

采用高标准、规范化的水土保持措施开发坡度10°—15° 的丘岗坡地，在植被良好(森林覆盖率 ≥ 85%）的前提下，降水的植被物拦截、土内渗流与地表径流量之比约为 3∶5∶2，比非水保坡地拦截的降水量增加 500—700 $mm \cdot yr^{-1}$，降水年径流系数可控制在 10.0% 左右、土壤年侵蚀模数可控制在 200.0 $t \cdot hm^{-2} \cdot yr^{-1}$ 以下，作物（林果）产量或生物量提高 23.8%—83.3%，形成“土涵水”“水养土”“生物生长旺盛”的“土壤—水分—生物”资源利用的互利型模式（图3）。

8 研究典型农田生态系统养分流失特征及影响因素构建丘岗复合农业生态系统氮磷拦截与生态消纳模式和稻田流失氮磷生态湿地消纳技术，为防控农田生态系统氮磷面源污染提供技术支撑

基于桃源站养分流失长期监测数据，系统分析了2001—2011 年典型丘岗复合农田生态系统集水区氮、磷和钾、钙、镁等养分输出特征及影响因素。结果发现，典型农田生态系统集水区的养分流失现象较为严重。其中，集水区地表径流中总氮浓度达到了 2.66 $mg \cdot L^{-1}$，超过了国家地表水 V 类水质标

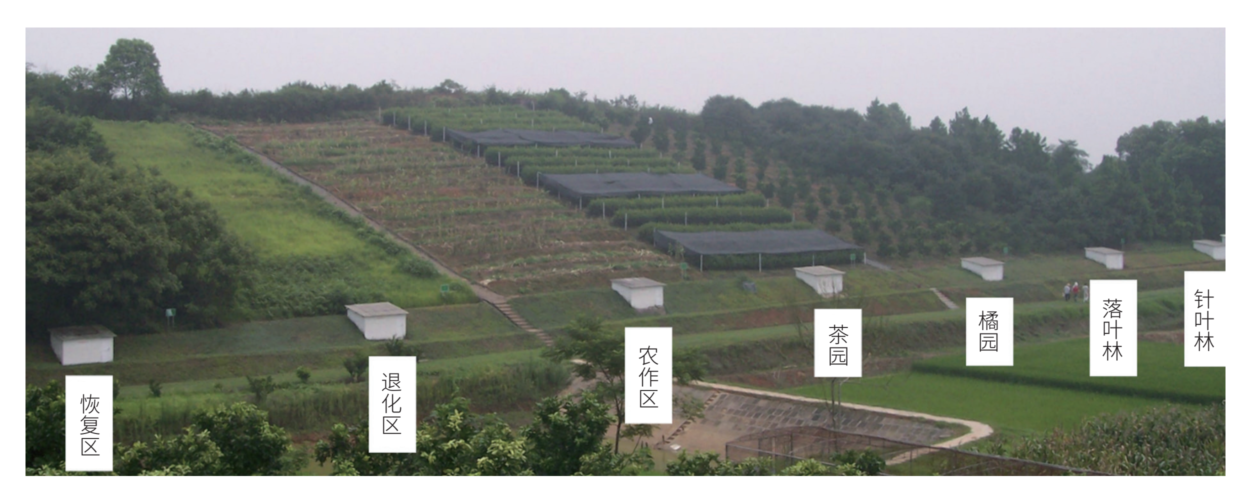


图 3 坡地不同利用方式长期定位试验（1996 至今）

准，年均流失量为 9.40 kg · hm^{-2}；总磷流失相对较轻，在地表径流中的浓度为 0.09 mg · L^{-1}，接近国家地表水 II 类水质标准，年均流失量为 0.30 kg · hm^{-2}。集水区中钾、钙、镁等阳离子的流失程度较氮、磷严重，其中钙的流失最为严重，年均流失量达到了 59.75 kg · hm^{-2}，大量的钙流失可能是导致我国亚热带地区酸性土壤进一步酸化的主要原因[50]。

典型农田生态系统集水区存在多种土地利用方式，明确不同土地利用方式对整个集水区的养分流失的影响程度，可为下一步开展针对性的调控措施提供科学依据。为此，我们构建了不同土地利用方式养分流失监测系统（图 4），通过连续 2 年的监测结果发现，稻田的地表径流产生次数和养分年均流失量远大于旱地和果园，其中总氮的年均流失量占整个集水区的 60%，总磷的年均流失量占整个集水区的 30%。但强降雨条件下的旱地和果园的单次养分流失量远大于稻田。因此，采取有效措施调控稻田生态系统养分循环过程是控制典型丘岗复合农业生态系统养分流失的关键，同时也应重视旱地和果园的养分流失问题。

基于丘陵区不同土地利用方式氮磷等养分的流失特征及影响因素，结合该地区存在季节性干旱问题，以桃源站的典型丘岗地貌为基础，通过修建蓄水池，构建了以“坡地（茶园）-旱地（油菜）-水田（中稻）-生态湿地（绿狐尾藻）”为主线的丘岗复合农业生态系统氮磷拦截与生态消纳模式。该模式不仅可以实现流失氮、磷的梯级拦截和消纳，还可以起到流失氮、磷和雨水循环利用的作用。连续 2 年的监测结果表明，该模式每年可减少氮流失 26.01 kg · hm^{-2}，磷流失 1.28 kg · hm^{-2}，最终出水的氮和磷浓度分别降低到国家地表水 III 类和 II 类水质标准。此外，该模式还可以有效提高水分利用效率 37%。生态湿地中的绿狐尾藻经收割作为有机肥施用到茶园，每年可提供氮素 129.63 kg · hm^{-2}，磷素 22.74 kg · hm^{-2}。

针对稻田氮流失严重的问题，我们构建了莲藕-绿狐尾藻组合湿地系统。结果显示，该湿地系统可消纳稻田排放出的 50% 的氮和 80% 的磷，经由湿地系统出水中的氮磷浓度可分别降低到国家地表水 III 类和 II 类水质标准。根据连续 2 年的试验结果推算，1 亩莲藕-绿狐尾藻复合人工湿地可以消纳 16 亩稻田排放出的氮、磷，使稻田出水达到国家水质 III 类排放标准。因此，在亚热带丘陵地区可以构建小型的莲藕-绿狐尾藻湿地消纳农田排出的氮磷，且兼具景观优化功能。

9 南方丘陵区坡地种草养羊与农牧资源循环利用模式构建与示范

我国南方丘陵区农村经济落后，青壮劳力进城

务工致使农村劳力匮乏，加之丘陵土壤贫瘠，经营粗放，作物收益低下，导致抛荒严重，农业转方式、调结构迫在眉睫[51,52]。2017年中央一号文件明确提出，扩大饲料作物种植面积，发展苜蓿等优质牧草，大力培育现代饲草料产业体系；大力发展牛羊等草食畜牧业；大力推行高效生态循环的种养模式。南方丘陵坡地分布广、水源足和气候宜，具备牧草种植条件；肉用草食动物市场需求旺盛，探索种草养羊与农牧资源循环利用的现代种养模式时机成熟且潜力巨大。针对南方丘陵区农业结构布局不合理的现状，桃源站初步构建南方丘陵区坡地种草养羊生态高值技术模式；集成坡地果树林下种草养羊技术，构建南方丘陵区坡地种养结合型立体农业模式；集成养羊废弃物资源利用技术和坡地果树林下种草养羊技术，构建南方丘陵区坡地种草养羊与农牧资源循环利用模式，开展示范与推广。示范区坡地水土流失减少50%，水分利用效率提高30%，经济效益提高30%（图5）。



图4 丘陵区坡地养分流失梯级消纳系统



图5 农林牧复合循环模式示范体

10 结束语

桃源站自1979年建站以来，围绕南方红壤丘陵区季节性干旱和水土流失造成的耕地质量退化、农业面源污染加重和农业结构布局不合理的现象，开展了一系列科学观测和研究、技术集成和示范。在南方红壤丘陵区复合农业生态系统构建与优化管理，流域农业环境污染防控以及农田生态系统碳氮循环过程机理研究等方面取得重大突破，为提高南方丘陵区红壤耕地质量，保证国家粮食安全和生态环境安全作出了重大贡献，为区域农业可持续发展提供了技术支撑。目前，桃源站通过完善野外长期定位试验平台，正在建设成农林牧复合循环农业生态系统。以“亚热带家畜养殖生态高值化技术体系”和“南方农村水体污染绿狐尾藻生态治理技术”为主要核心技术服务当地农业可持续发展。未来，桃源站在中国科学院“率先行动”计划指导下，将为区域农业可持续发展作出更大的贡献。

参考文献

1 中国科学院. 桃源综合考察报告集. 长沙：湖南科学技术出版社, 1980.

2 湖南省桃源县农业局土肥站. 湖南省桃源县土壤志. 1979年12月.

3 古汉龙. 潜育化水稻土田间开沟治渍研究. 土壤通报, 1993, 24 (3): 108-110.

4 古汉虎. 水旱轮作改良利用潜育化水稻土的研究. 热带亚热带土壤科学, 1995, 4(2): 79-84.

5 何电源, 王昌燎, 邓世林, 等. 潜育化水稻土中有机物的矿化特性及杂交水稻对氮素的利用特点. 农业现代化研究, 1984, (2): 39-44.

6 中国科学院长沙农业现代化研究所潜育性水稻土改良课题协作组. 潜育性和次生潜育化水稻土的形成及改良途径的研究总结报告. 农业现代化研究, 1984, (6): 5-25.

7 Chen A L, Xie X L, Dorodnikov M, et al. Response of paddy soil organic carbon accumulation to changes in long-term yield-driven carbon inputs in subtropical China. Agriculture Ecosystem and Environment, 2016, 232: 302-311.

8 陈安磊, 谢小立, 文菀玉, 等. 长期施肥对红壤稻田表层土壤氮储量的影响. 生态学报, 2010, 30(18): 5059-5065.

9 陈安磊, 王卫, 张文钊, 等. 一种基于目标产量的红壤稻田减量化肥施用方法: 中国, ZL201410257606.3, 2015-09-30.

10 王季丰. 稻田养分流失和经济林水土流失控制技术的研究. 杭州: 浙江大学, 2017.

11 吴敬民, 姚月明, 陈永芳, 等. 水稻基肥机械深施及肥料运筹方式效果研究. 土壤通报, 1999, 30(3): 110-112.

12 吴敬民, 许学前, 姚月明. 基肥不同施用方法对水稻生长及稻田周围水体污染的影响. 土壤通报, 1999, 30(5): 232-234.

13 冯国禄, 李书迪, 许尤厚, 等. 撒施液体复合肥后不同蓄水深度的水分管理对稻田养分流失潜力的影响. 中国土壤与肥料, 2018, (1): 83-86.

14 张文钊, 侯海军, 魏文学, 等. 一种基于降低稻田氮、磷面源污染的化肥减量深施方法: 中国, ZL201510860791.X, 2018-04-10.

15 田文文, 王卫, 陈安磊, 等. 红壤稻田弃耕后植被和土壤有机碳对积水与火烧的早期响应. 植物生态学报, 2014, 38(6): 626-634.

16 彭亿, 李裕元, 李忠武, 等. 亚热带稻田弃耕湿地土壤因子对植物群落结构的影响. 应用生态学报, 2009, 20(7): 1543-1550.

17 Chen A L, Xie X L, Ge T D, et al. Rapid decrease of soil carbon after abandonment of subtropical paddy fields. Plant and Soil, 2017, 415: 203-214.

18 尉海东. 稻田甲烷排放研究进展. 中国农学通报, 2013, 29(18): 6-10.

19 Sass R L, Fisher F M, Harcombe P A, et a1. Methane Production and emission in a Texas rice field. Global Biogeochemistry Cycles, 1992, 4(1): 47-68.

20 Ruser R, Flessa H, Russow R, et al. Emission of N_2O, N_2 and CO_2 from soil fertilized with nitrate: Effect of compaction, soil moisture and rewetting. Soil Biology and Biochemistry, 2006, 38: 263-274.

21 侯海军, 秦红灵, 陈春兰, 等. 土壤氮循环微生物过程的分子生态学研究进展. 农业现代化研究, 2014, 35(5): 588-594.

22 Liu J B, Hou H J, Sheng R, et al. Denitrifying communities differentially respond to flooding drying cycles in paddy soils. Applied Soil Ecology, 2012, 62: 155-162.

23 Yang H C, Sheng R, Zhang Z X, et al. Responses of nitrifying and denitrifying bacteria to flooding-drying cycles in flooded rice soil. Applied Soil Ecology, 2016, 103: 101-109.

24 Zhang Z X, Zhang W Z, Yang H C, et al. Elevated N_2O emission by the rice roots: basedon the abundances of *narG* and bacterial *amoA* genes. Environmental Science and Pollution Research, 2017, 24(2): 1-10.

25 Sheng R, Qin H L, O'Donnell A G, et al. Bacterial succession in paddy soils derived from different parent materials. Journal of Soils and Sediments, 2015, 15(4):982-992.

26 李颖慧. 猪肌肉组织对低蛋白日粮的响应及其机制研究. 北京: 中国科学院大学, 2017.

27 侯水生, 黄苇. 生长猪理想蛋白质与氨基酸模式研究进展. 中国饲料, 1999, (1): 16-18.

28 谢荣华. 理想蛋白质的研究进展. 中国饲料, 1997, (19): 8-10.

29 Deng D, Yao K, Chu W, et al. Impaired translation initiation activation and reduced protein synthesis in weaned piglets fed a low-protein diet. Journal of Nutritional Biochemistry, 2009, 20(7): 544-552.

30 He L, Wu L, Xu Z, et al. Low-protein diets affect ileal amino acid digestibility and gene expression of digestive enzymes in growing and finishing pigs. Amino Acids, 2016, 48(1): 21-30.

31 Duan Y H, Guo Q P, Wen C Y, et al. Free amino acid profile and expression of genes related to protein metabolism in skeletal muscle of growing pigs fed low-protein diets supplemented with branched-chain amino acids. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2016, 64: 9390-9400.

32 全智, 吴金水, 魏文学, 等. 长期种植蔬菜后土壤中氮、磷有效养分和重金属含量变化. 应用生态学报, 2011, 22(11): 2919-2929.

33 沈灵凤, 白玲玉, 曾希柏, 等. 施肥对设施菜地土壤硝态氮累积及pH的影响. 农业环境科学学报, 2012, 31(7): 1350-1356.

34 Wells A T, Chanb K Y, Cornish P S. Comparison of conventional and alternative vegetable farming systems on the properties of a yellow earth in New South Wales. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2000, 80: 47-60.

35 Huang B, Shi X Z, Yu D S, et al. Environmental assessment of small-scale vegetable farming systems in periurban areas of the Yangtze River Delta Region, China. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2006, 112: 391-402.

36 Sharma R K, Agrawal M, Marshall F. Heavy metal contamination of soil and vegetables in suburban areas of Varanasi, India. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2007, 66: 258-266.

37 孟德龙, 杨扬, 伍延正, 等. 多年蔬菜连作对土壤氨氧化微生物群落组成的影响. 环境科学, 2012, 33(4): 1331-1338.

38 Sheng R, Meng D L, Wu M N, et al. Effect of agricultural land use change on community composition of bacteria and ammonia oxidizers. Journal of Soils and Sediments, 2013, 13: 1246-1256.

39 全智, 秦红灵, 李明德, 等. 氮肥优化减施对土壤氮磷累积及蔬菜产量品质的影响. 水土保持学报, 2011, 25(3): 103-112.

40 杨扬, 孟德龙, 秦红灵, 等. 硝化抑制剂对蔬菜土硝化和反硝化细菌的影响. 生态学报, 2012, 32(21): 6803-6810.

41 Liu Y, Yang Y, Qin H L, et al. Differential responses of nitrifier and denitrifier to dicyandiamide in short- and long-term intensive vegetable cultivation soils. Journal of Integrative Agriculture, 2014, 13(5): 1090-1098.

42 谢小立, 王凯荣. 红壤坡地雨水地表径流及其侵蚀. 农业环境科学学报, 2004, 25(5): 839-845.

43 袁敏, 文石林, 秦琳, 等. 湘南红壤丘陵区不同生态模式水土流失特征. 水土保持学报, 2012, 26(6): 21-26.

44 王飞, 陈安磊, 彭英湘, 等. 土地利用方式对红壤坡地水土流失的影响. 水土保持学报, 2013, 27(1): 22-26.

45 陈安磊, 王卫, 张文钊, 等. 土地利用方式对红壤坡地地表径流氮素流失的影响. 水土保持学报, 2015, 29(1): 101-106.

46 谢颂华, 曾建玲, 杨洁, 等. 南方红壤坡地不同耕作措施的水土保持效应. 农业工程学报, 2010, 2(9): 81-86.

47 汪邦稳, 肖胜生, 张光辉, 等. 南方红壤区不同利用土地产流产沙试验研究. 农业工程学报, 2012, 28(2): 239-243.

48 秦红灵, 袁红朝, 张慧, 等. 红壤坡地利用方式对土壤细菌群落结构的影响. 土壤学报, 2011, 48(3):148-156.

49 Qin H L, Yuan H Z, Zhang H, et al. Ammonia- oxidizing archaea are more important than ammonia-oxidizing bacteria in nitrification and NO_3^--N loss in acidic soil of sloped land. Biology and Fertility of Soils, 2013, 49(6): 767-776.

50 Zhang W Z, Yin C M, Chen C L, et al. Estimation of long-term Ca^{2+} loss through outlet flow from an agricultural watershed and the influencing factors. Environmental Science and Pollution Research, 2016, 23: 10911-10921.

51 马历, 龙花楼, 张英男, 等. 中国县域农业劳动力变化与农业经济发展的时空耦合及其对乡村振兴的启示. 地理学报, 2018, 73(12): 2364-2377.

52 侯孟阳, 姚顺波. 中国农村劳动力转移对农业生态效率影响的空间溢出效应与门槛特征. 资源科学, 2018, 40(12): 2475-2486.

Long-term Observational Studies of Complex Agro-ecosystem Promotes Agricultural Sustainable Development in Hilly Red Soil Region of South China

WEI Wenxue* XIE Xiaoli QIN Hongling LI Fengna CHEN Anlei ZHANG Wenzhao SHENG Rong
CHEN Yanguo HOU Haijun YIN Chunmei CHEN Chunlan LIU Yi WANG Wei LIU Fei

(1 Key Laboratory of Agro-ecological Processes in Subtropical Region, Institute of Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Sciences, Changsha 410125, China;

2 Taoyuan Agro-ecosystem Research Station, Chinese Academy of Sciences, Taoyuan 415700, China)

Abstract The red soil hilly areas in South China were prone to soil erosion due to their poor soil viscosity, poor water permeability, and inadequate seasonal rainfall distribution. Inappropriate tillage measures aggravated soil erosion, decreased soil fertility, and therefore restricted the sustainable development of local agriculture. Since the Taoyuan Agro-ecosystem Research Station, Chinese Academy of Sciences (CAS) was established in 1979, researchers have systematically upgraded management of regional agricultural ecosystem, increased the overall agricultural benefits, and established a technical system and an optimized mode of the comprehensive development of regional agriculture in the station. The demonstration and promotion will provide important theoretical and technical support for soil erosion control, regional agricultural restructuring, and the improvement of farmland productivity and ecological environment in red soil hilly areas in South China. We have systematically studied the formation mechanism of gley and secondary gley paddy soil to provide technical support for gleyed paddy field management; the coordination mechanism between sustainable productivity and system health of paddy field ecosystem to provide theoretical basis and technical support for sustainable and efficient production of paddy field ecosystem in red soil; the microbial mechanism driving the key processes of N_2O and CH_4 emission from rice fields to provide vital scientific basis for reducing greenhouse gas emission in farmland of China; the distribution pattern and the main driving factors of soil bacteria and denitrifying microorganism in farmland to depict the composition of farmland soil microbial community in the large scale; the control mechanism of functional amino acid metabolism and physiological function of pig diet to scientifically improve the level of pig breeding and the development of China's pig breeding industry in a healthy and sustainable way; nitrogen transformation mechanism in vegetable soil and the corresponding control measures to provide a strong theoretical foundation and technical support for nitrogen control in vegetable soil; the characteristics and influencing factors of nutrient loss in typical farmland ecosystem, the model of nitrogen and phosphorus interception and ecological absorption in hilly composite agricultural ecosystem to provide technical support for the prevention and control of non-point source pollution of nitrogen and phosphorus in farmland ecosystems; recycling utilization model of agricultural and pastoral resources to promote the sustainable development of local agriculture. In the future, the scientists of Taoyuan Agro-ecosystem Research Station will make greater contribution to the sustainable development of regional agriculture under the guidance of the "Pioneer Initiative Action " plan of CAS.

Keywords red soil in South China, soil erosion, cultivated land degradation, greenhouse gas emission, agro-pastoral ecosystem, sustainable development

*Corresponding author



魏文学　中国科学院亚热带农业生态研究所研究员，中国科学院桃源农业生态试验站站长，中国科学院“百人计划”入选者、中国科学院“朱李月华优秀教师奖”获得者、享受国务院政府特殊津贴，并兼任中国土壤学会土壤生物与生物化学专业委员会副主任、国家土壤质量标准化技术委员会（SAC/TC404）委员、湖南省土壤肥料学会常务理事、湖南省海外交流协会第三届理事会理事。长期从事土壤养分循环过程与机理研究，重点围绕农田生态系统碳、氮、磷循环过程的微生物作用机理及调控技术开展研究。曾先后主持中国科学院“百人计划”、国家自然科学基金面上项目、重点项目、中国科学院战略性先导科技专项子课题等课题10余项。迄今已发表学术论文100余篇，其中SCI检索论文40余篇，获省部级科技奖2项，申请专利6项。E-mail: wenxuewei@isa.ac.cn

WEI Wenxue　Ph.D., Professor in the Institute of Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Sciences (CAS), and the Director of Taoyuan Agro-ecosystem Research Station, CAS. He currently serves as a Vice Director of Soil Biology and Biochemistry Committee of Chinese Soil Society, a member of National Technical Committee on Soil Quality of Standardization Administration of China (SAC/TC404), a standing director of Hunan Soil Fertilizer Society, and a member of The Third Council of Hunan Overseas Exchange Association. He has wide interests in soil nutrient cycling and related microbial mechanisms, especially in carbon, nitrogen, and phosphorus cycling in agricultural systems. Till now, he has presided over more than 10 projects, including the National Natural Science Foundation of China and the Strategic Priority Project of CAS. He has published more than 100 related academic papers, including more than 40 SCI indexed papers and has six authorized patents. He enjoys the government special allowance of the State Council, and he is the winner of “Hundred Talents Project” from CAS in 2006 and the “Zhuliyuehua Excellent Teacher Award” of CAS in 2016. As the main accomplisher, he was awarded the first prize of Natural Science Award of Hunan Province in 2016 and the second prize of Scientific and Technological Progress Award of Ministry of Education in 2018. E-mail: wenxuewei@isa.ac.cn

■责任编辑：刘天星

参考文献（双语版）

1 中国科学院. 桃源综合考察报告集. 长沙: 湖南科学技术出版社, 1980.

Chinese Academy of Sciences. Comprehensive Investigation Report Collection of Taoyuan. Changsha: Hunan Science and Technology Press, 1980. (in Chinese)

2 湖南省桃源县农业局土肥站. 湖南省桃源县土壤志. 1979年12月.

Soil Fertilizer Station of Agricultural Bureau of Taoyuan, Hunan. Soil Records of Taoyuan County, Hunan Province. December, 1979. (in Chinese)

3 古汉龙. 潜育化水稻土田间开沟治渍研究. 土壤通报, 1993, 24(3): 108-110.

Gu H L. Study on trenching and waterlogging control of gleying paddy soil. Chinese Journal of Soil Science, 1993, 24(3): 108-110. (in Chinese)

4 古汉虎. 水旱轮作改良利用潜育化水稻土的研究. 热带亚热带土壤科学, 1995, 4(2): 79-84.

Gu H F. Effects of rice-xerophyte rotation on amelioration of paddy soil. Tropical and Subtropical Soil Science, 1995, 4(2): 79-84. (in Chinese)

5 何电源, 王昌燎, 邓世林, 等. 潜育化水稻土中有机物的矿化特性及杂交水稻对氮素的利用特点. 农业现代化研究, 1984, 5(2): 39-44.

He D Y, Wang C L, Deng S L, et al. Mineralization characteristics of organic matter in gleying paddy soil and nitrogen utilization characteristics of hybrid rice. Research of Agricultural Modernization, 1984, 5(2): 39-44. (in Chinese)

6 中国科学院长沙农业现代化研究所潜育性水稻土改良课题协作组. 潜育性和次生潜育化水稻土的形成及改良途径的研究总结报告. 农业现代化研究, 1984, 5(6): 5-25.

Collaborative Group of Gleying Paddy Soil Improvement Project, Changsha Institute of Agricultural Modernization, Chinese Academy of Sciences. Research report on the formation and improvement of gleying and secondary gleying paddy soil. Research of Agricultural Modernization, 1984, 5(6): 5-25. (in Chinese)

7 Chen A L, Xie X L, Dorodnikov M, et al. Response of paddy soil organic carbon accumulation to changes in long-term yield-driven carbon inputs in subtropical China. Agriculture Ecosystem & Environment, 2016, 232: 302-311.

8 陈安磊, 谢小立, 文菀玉, 等. 长期施肥对红壤稻田表层土壤氮储量的影响. 生态学报, 2010, 30(18): 5059-5065.

Chen A L, Xie X L, Wen W Y, et al. Effect of long term fertilization on soil profile nitrogen storage in a reddish paddy soil. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30(18): 5059-5065. (in Chinese)

9 陈安磊, 王卫, 张文钊, 等. 一种基于目标产量的红壤稻田减量化肥施用方法: 中国, ZL201410257606.3, 2015-09-30.

Chen A L, Wang W, Zhang W Z, et al. Reduced application of chemical fertilizer in red paddy soil based on target yield: China, ZL201410257606.3. 2015-09-30. (in Chinese)

10 王季丰. 稻田养分流失和经济林水土流失控制技术的研究. 杭州: 浙江大学, 2017.

Wang J F. Studies on the techniques for controlling nutrient runoff losses from rice fields and soil erosion from nonwood forests. Hangzhou: Zhejiang University, 2017. (in Chinese)

11 吴敬民, 姚月明, 陈永芳, 等. 水稻基肥机械深施及肥料运筹方式效果研究. 土壤通报, 1999, 30(3): 110.

Wu J M, Yao Y M, Chen Y F, et al. Study on the effect of deep mechanized application and management of basal fertilizer of rice. Chinese Journal of Soil Science, 1999, 30(3): 110. (in Chinese)

12 吴敬民, 许学前, 姚月明. 基肥不同施用方法对水稻生长及稻田周围水体污染的影响. 土壤通报, 1999, 30(5): 232-234.

Wu J M, Xu X Q, Yao Y M. Effects of different application

methods of basal fertilizer on rice growth and water pollution around paddy field. Chinese Journal of Soil Science, 1999, 30(5): 232-234. (in Chinese)

13 冯国禄, 李书迪, 许尤厚, 等. 撒施液体复合肥后不同蓄水深度的水分管理对稻田养分流失潜力的影响. 中国土壤与肥料, 2018, (1): 83-86.

Feng G L, Li S D, Xu Y H, et al. Effects of water management from different water storage depth after fluid compound fertilizer application on nutrient loss potential of paddy field. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2018, (1): 83-86. (in Chinese)

14 张文钊, 侯海军, 魏文学, 等. 一种基于降低稻田氮、磷面源污染的化肥减量深施方法: 中国, ZL201510860791.X, 2018-04-10.

Zhang W Z, Hou H J, Wei W X, et al. A reduced deep application method of fertilizer based on alleviating non-point pollution of nitrogen and phosphorus: China, ZL201510860791.X. 2018-04-10. (in Chinese)

15 田文文, 王卫, 陈安磊, 等. 红壤稻田弃耕后植被和土壤有机碳对积水与火烧的早期响应. 植物生态学报, 2014, 38(6): 626-634.

Tian W W, Wang W, Chen A L, et al. Early responses of vegetation and soil organic carbon to waterlogging and winter wildfire on abandoned red paddy soils. Chinese Journal of Plant Ecology, 2014, 38(6): 626-634. (in Chinese)

16 彭亿, 李裕元, 李忠武, 等. 亚热带稻田弃耕湿地土壤因子对植物群落结构的影响. 应用生态学报, 2009, 20(7): 1543-1550.

Peng Y, Li Y Y, Li Z W, et al. Effects of soil factors on vegetation community structure in an abandoned subtropical paddy wetland. Chinese Journal of Applied Ecology, 2009, 20(7): 1543-1550. (in Chinese)

17 Chen A L, Xie X L, Ge T D, et al. Rapid decrease of soil carbon after abandonment of subtropical paddy fields. Plant and Soil, 2017, 415(1-2): 203-214.

18 尉海东. 稻田甲烷排放研究进展. 中国农学通报, 2013, 29(18): 6-10.

Wei H D. Research progress about methane emission from paddy fields. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2013, 29(18): 6-10. (in Chinese)

19 Sass R L, Fisher F M, Harcombe P A, et al. Methane production and emission in a Texas rice field. Global Biogeochemical Cycles, 1990, 4(1): 47-68.

20 Ruser R, Flessa H, Russow R, et al. Emission of N_2O, N_2 and CO_2 from soil fertilized with nitrate: Effect of compaction, soil moisture and rewetting. Soil Biology and Biochemistry, 2006, 38(2): 263-274.

21 侯海军, 秦红灵, 陈春兰, 等. 土壤氮循环微生物过程的分子生态学研究进展. 农业现代化研究, 2014, 35(5): 588-594.

Hou H J, Qin H L, Chen C L, et al. Research progress of the molecular ecology on microbiological processes in soil nitrogen cycling. Research of Agricultural Modernization, 2014, 35(5): 588-594. (in Chinese)

22 Liu J B, Hou H J, Sheng R, et al. Denitrifying communities differentially respond to flooding drying cycles in paddy soils. Applied Soil Ecology, 2012, 62: 155-162.

23 Yang H C, Sheng R, Zhang Z X, et al. Responses of nitrifying and denitrifying bacteria to flooding-drying cycles in flooded rice soil. Applied Soil Ecology, 2016, 103: 101-109.

24 Zhang Z X, Zhang W Z, Yang H C, et al. Elevated N_2O emission by the rice roots: Based on the abundances of *narG* and bacterial *AmoA* genes. Environmental Science and Pollution Research International, 2017, 24(2): 2116-2125.

25 Sheng R, Qin H L, O'Donnell A G, et al. Bacterial succession in paddy soils derived from different parent materials. Journal of Soils and Sediments, 2015, 15(4):982-992.

26 李颖慧. 猪肌肉组织对低蛋白日粮的响应及其机制研究.

北京: 中国科学院大学, 2017.

Li Y H. Study on the response of swine muscle tissues to low protein diet and its mechanism. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2017. (in Chinese)

27 侯水生, 黄苇. 生长猪理想蛋白质与氨基酸模式研究进展. 中国饲料, 1999, (1): 16-18.

Hou S S, Huang W. Research progress on ideal protein and amino acid pattern of swine growth. China Feed, 1999, (1): 16-18. (in Chinese)

28 谢荣华. 理想蛋白质的研究进展. 中国饲料, 1997, (19): 8-10.

Xie R H. Research progress of ideal protein, China Feed, 1997, (19): 8-10. (in Chinese)

29 Deng D, Yao K, Chu W, et al. Impaired translation initiation activation and reduced protein synthesis in weaned piglets fed a low-protein diet. The Journal of Nutritional Biochemistry, 2009, 20(7): 544-552.

30 He L, Wu L, Xu Z, et al. Low-protein diets affect ileal amino acid digestibility and gene expression of digestive enzymes in growing and finishing pigs. Amino Acids, 2016, 48(1): 21-30.

31 Duan Y H, Guo Q P, Wen C Y, et al. Free amino acid profile and expression of genes implicated in protein metabolism in skeletal muscle of growing pigs fed low-protein diets supplemented with branched-chain amino acids. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2016, 64(49): 9390-9400.

32 全智, 吴金水, 魏文学, 等. 长期种植蔬菜后土壤中氮、磷有效养分和重金属含量变化. 应用生态学报, 2011, 22(11): 2919-2929.

Quan Z, Wu J S, Wei W X, et al. Change characteristics of soil available nitrogen and phosphorus and heavy metal contents after long-term cultivation of vegetables. Chinese Journal of Applied Ecology, 2011, 22(11): 2919-2929. (in Chinese)

33 沈灵凤, 白玲玉, 曾希柏, 等. 施肥对设施菜地土壤硝态氮累积及pH的影响. 农业环境科学学报, 2012, 31(7): 1350-1356.

Shen L F, Bai L Y, Zeng X B, et al. Effects of fertilization on NO_3-N accumulation in greenhouse soils. Journal of Agro-Environment Science, 2012, 31(7): 1350-1356. (in Chinese)

34 Wells A T, Chanb K Y, Cornish P S. Comparison of conventional and alternative vegetable farming systems on the properties of a yellow earth in New South Wales. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2000, 80(1-2): 47-60.

35 Huang B, Shi X Z, Yu D S, et al. Environmental assessment of small-scale vegetable farming systems in peri-urban areas of the Yangtze River Delta Region, China. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2006, 112(4): 391-402.

36 Sharma R K, Agrawal M, Marshall F. Heavy metal contamination of soil and vegetables in suburban areas of Varanasi, India. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2007, 66(2): 258-266.

37 孟德龙, 杨扬, 伍延正, 等. 多年蔬菜连作对土壤氨氧化微生物群落组成的影响. 环境科学, 2012, 33(4): 1331-1338.

Meng D L, Yang Y, Wu Y Z, et al. Effects of continuous cropping of vegetables on ammonia oxidizers community structure. Environmental Science, 2012, 33(4): 1331-1338. (in Chinese)

38 Sheng R, Meng D L, Wu M N, et al. Effect of agricultural land use change on community composition of bacteria and ammonia oxidizers. Journal of Soils and Sediments, 2013, 13(7): 1246-1256.

39 全智, 秦红灵, 李明德, 等. 氮肥优化减施对土壤氮磷累积及蔬菜产量品质的影响. 水土保持学报, 2011, 25(3): 103-107.

Quan Z, Qin H L, Li M D, et al. Soil nitrogen and phosphorus accumulation, vegetable yield and quality influenced by reduction and optimization of nitrogen fertilizer application. Journal of Soil and Water Conservation, 2011, 25(3): 103-112. (in Chinese)

40 杨扬, 孟德龙, 秦红灵, 等. 硝化抑制剂对蔬菜土硝化和反硝化细菌的影响. 生态学报, 2012, 32(21): 6803-6810.

Yang Y, Meng D L, Qin H L, et al . Mechanism of nitrification inhibitor on nitrogen-transformation bacteria in vegetable soil. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(21): 6803-6810. (in Chinese)

41 Liu Y, Yang Y, Qin H L, et al. Differential responses of nitrifier and denitrifier to dicyandiamide in short- and long-term intensive vegetable cultivation soils. Journal of Integrative Agriculture, 2014, 13(5): 1090-1098.

42 谢小立, 王凯荣．红壤坡地雨水地表径流及其侵蚀. 农业环境科学学报, 2004, 23(5): 839-845.

Xie X L, Wang K R. Surface runoff from rainfall and its erosion on slop lands of a red soil. Journal of Agro-Environmental Science, 2004, 23(5): 839-845. (in Chinese)

43 袁敏, 文石林, 秦琳, 等. 湘南红壤丘陵区不同生态模式水土流失特征. 水土保持学报, 2012, 26(6): 21-26.

Yuan M, Wen S L, Qin L, et al. Characteristics of soil and water loss under different ecological planting patterns in red soil hilly region of southern Hunan Province. Journal of Soil and Water Conservation, 2012, 26(6): 21-26. (in Chinese)

44 王飞, 陈安磊, 彭英湘, 等. 不同土地利用方式对红壤坡地水土流失的影响. 水土保持学报, 2013, 27(1): 22-26.

Wang F, Chen A L, Peng Y X, et al. Effects of red soil slope field under different land-use patterns on surface runoff and soil erosion. Journal of Soil and Water Conservation, 2013, 27(1): 22-26. (in Chinese)

45 陈安磊, 王卫, 张文钊, 等. 土地利用方式对红壤坡地地表径流氮素流失的影响. 水土保持学报, 2015, 29(1): 101-106.

Chen A L, Wang W, Zhang W Z, et al. Effects of nitrogen losses in a red soil slope field under long-term land use patterns. Journal of Soil and Water Conservation, 2015, 29(1): 101-106. (in Chinese)

46 谢颂华, 曾建玲, 杨洁, 等. 南方红壤坡地不同耕作措施的水土保持效应. 农业工程学报, 2010, 26(9): 81-86.

Xie S H, Zeng J L, Yang J, et al. Effects of different tillage measures on soil and water conservation in slope farmland of red soil in southern China. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2010, 26(9): 81-86. (in Chinese)

47 汪邦稳, 肖胜生, 张光辉, 等. 南方红壤区不同利用土地产流产沙特征试验研究. 农业工程学报, 2012, 28(2): 239-243.

Wang B W, Xiao S S, Zhang G H, et al. Study on runoff and sediment yield characteristics under different land uses in red soil area of Southern China. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(2): 239-243. (in Chinese)

48 秦红灵, 袁红朝, 张慧, 等. 红壤坡地利用方式对土壤细菌群落结构的影响. 土壤学报, 2011, 48(3): 594-602.

Qin H L, Yuan H Z, Zhang H, et al. Soil bacteria community structure in upland red soil in relation to land use pattern. Acta Pedologica Sinica, 2011, 48(3):148-156. (in Chinese)

49 Qin H L, Yuan H Z, Zhang H, et al. Ammonia-oxidizing archaea are more important than ammonia-oxidizing bacteria in nitrification and NO^{3-}-N loss in acidic soil of sloped land. Biology and Fertility of Soils, 2013, 49(6): 767-776.

50 Zhang W Z, Yin C M, Chen C L, et al. Estimation of long-term Ca^{2+} loss through outlet flow from an agricultural watershed and the influencing factors. Environmental Science and Pollution Research, 2016, 23: 10911-10921.

51 马历, 龙花楼, 张英男, 等. 中国县域农业劳动力变化与农业经济发展的时空耦合及其对乡村振兴的启示. 地理学报, 2018, 73(12): 2364-2377.

Ma L, Long H L, Zhang Y N, et al. Spatio-temporal coupling relationship between agricultural labor changes and agricultural economic development at county level in China and its implications for rural revitalization. Acta Geographica Sinica, 2018, 73(12): 2364-2377. (in Chinese)

52 侯孟阳, 姚顺波. 中国农村劳动力转移对农业生态效率影响的空间溢出效应与门槛特征. 资源科学, 2018, 40(12): 2475-2486.

Hou M Y, Yao S B. Spatial spillover effects and threshold characteristics of rural labor transfer on agricultural eco-efficiency in China. Resources Science, 2018, 40(12): 2475-2486. (in Chinese)